

(19)日本国特許庁 (J P)

(12) 公 開 特 許 公 報 (A)

(11)特許出願公開番号

特開2003-31399

(P2003-31399A)

(43)公開日 平成15年1月31日(2003.1.31)

(51)Int.Cl. ⁷	識別記号	F I	テーマコード*(参考)
H 0 5 H 7/04	Z A A	H 0 5 H 7/04	Z A A 2 G 0 8 5
G 2 1 K 1/093		G 2 1 K 1/093	D
H 0 1 F 6/00		H 0 5 H 13/04	E
H 0 5 H 13/04		7/06	
// H 0 5 H 7/06		H 0 1 F 7/22	A
審査請求 未請求 請求項の数9 O L (全 7 頁)			

(21)出願番号 特願2001-215874(P2001-215874)

(22)出願日 平成13年7月16日(2001.7.16)

(71)出願人 396020800

科学技術振興事業団

埼玉県川口市本町4丁目1番8号

(71)出願人 301032942

独立行政法人放射線医学総合研究所

千葉県千葉市稲毛区穴川四丁目9番1号

(72)発明者 熊田 雅之

千葉県千葉市稲毛区穴川4-9-1 独立

行政法人放射線医学総合研究所内

(74)代理人 100093230

弁理士 西澤 利夫

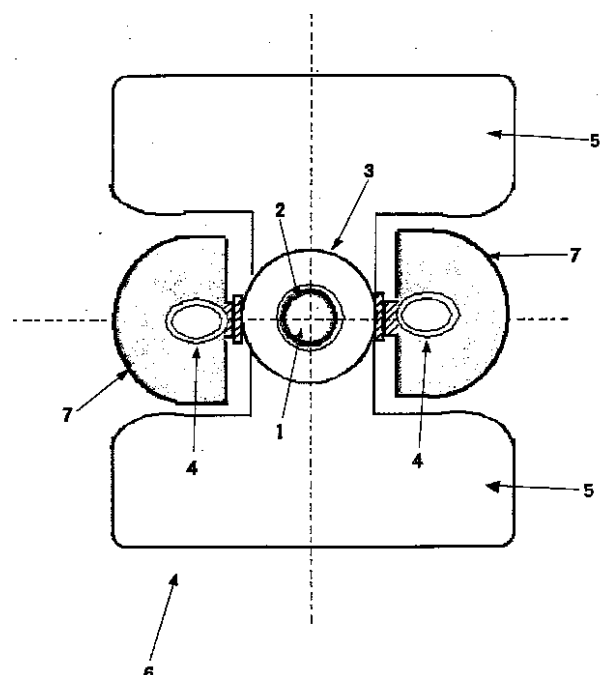
最終頁に続く

(54)【発明の名称】 永久磁石組込型高磁場発生装置

(57)【要約】

【課題】 超伝導伝送線路マグネットや、従来の電磁石で不可能であった磁場分布の精度を保ちつつ、磁場強度を増大させる高磁場発生装置を提供する。

【解決手段】 永久磁石を、超伝導伝送線路マグネット或いは従来の電磁石の空隙内部に挿入することで、鉄を更に飽和させることなく、永久磁石の磁極間の空隙磁場の磁場強度を4テスラ近くまで増大させる。



【特許請求の範囲】

【請求項 1】 鉄芯及び鉄ヨークを用いず磁極間に空隙を有する永久磁石を、鉄芯及び鉄ヨークの少なくとも一方を用いた超伝導電磁石による外部磁場中に置き、鉄芯及び鉄ヨークの少なくとも一方を飽和させることなく加速器の性能に必要な高い磁場の空間分布を維持しつつ、永久磁石に設けた空隙中の磁場強度が、永久磁石による磁場と超伝導電磁石による外部磁場の合成磁場の磁場強度となることを特徴とする高磁場発生装置。

【請求項 2】 請求項 1 に記載の合成磁場の磁場強度が、2 テスラ以上であることを特徴とする高磁場発生装置。

【請求項 3】 鉄芯及び鉄ヨークを用いず磁極間に空隙を有する永久磁石を、超伝導材料以外の材料から成る通常のコイルと鉄芯及び鉄ヨークの少なくとも一方を用いて磁場を発生させる電磁石の空隙中に置き、鉄芯及び鉄ヨークの少なくとも一方を飽和させることなく加速器の性能に必要な高い磁場の空間分布を維持しつつ、永久磁石に設けた空隙中の磁場強度が、永久磁石による磁場と電磁石による磁場の合成磁場の磁場強度となることを特徴とする高磁場発生装置。

【請求項 4】 請求項 3 に記載の合成磁場の磁場強度が、2 テスラ以上であることを特徴とする高磁場発生装置。

【請求項 5】 請求項 3 において、速い励磁の繰返しの運転を可能とするため、永久磁石の構成要素が絶縁された小さい単位磁石であることを特徴とする高磁場発生装置。

【請求項 6】 請求項 1 又は 3 に記載の永久磁石が、希土類系の磁石材料から成ることを特徴とする高磁場発生装置。

【請求項 7】 請求項 1 又は 3 において、永久磁石を液体窒素温度で冷却し、磁場の温度安定性を向上し残留磁束密度および保磁力をも併せて向上させることを特徴とする高磁場発生装置。

【請求項 8】 請求項 1 ～ 7 のいずれかにおいて、電磁石と永久磁石の組合せが、加速器のビーム方向に対して横方向の面内での組合せであることを特徴とする高磁場発生装置。

【請求項 9】 請求項 1 ～ 8 のいずれかにおいて、シンクロトロン加速器で荷電粒子を収束させる際に電磁石と永久磁石の磁場勾配の比が等しくなることを特徴とする高磁場発生装置。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】この出願の発明は、永久磁石組込型高磁場発生装置に関するものである。さらに詳しくは、この出願の発明は、高エネルギー物理学、原子核物理学、エネルギー科学、物質・材料科学、生命科学、医療利用研究等に利用可能な、シンクロトロン、サイク

ロトロン、貯蔵リング（ストレージリング）等の円形荷電粒子加速器において、荷電粒子を偏向及び収束・発散させるために必要な高強度の磁場を形成する、永久磁石組込型高磁場発生装置に関するものである。

【0002】

【従来の技術とその課題】これまで、加速器科学の中でもシンクロトロン、サイクロトロン、貯蔵リング（ストレージリング）等の円形荷電粒子加速器の研究開発においては、加速する或いは貯蔵する荷電粒子のエネルギー又は粒子数を増加させる方向に研究目標が置かれてきた。特に、衝突型加速器においては、荷電粒子の衝突頻度（ルミノシティ）を増加させることに努力がなされてきた。

【0003】荷電粒子の加速エネルギーを増加させるためには、加速器のサイズを大きくし、且つ荷電粒子を偏向及び収束・発散させるための磁石の磁場強度を高める必要がある。磁場強度を高めるために超伝導電磁石技術の導入がなされたが、高エネルギー物理学や原子核物理学等の分野において要求されるレベルまでには到底及ばず、加速器のサイズばかりが肥大化することとなり、ついには周長が数十キロメートルにも及び巨大な円形加速器が開発されるにまで至った。

【0004】アメリカ合衆国においては、円形衝突型加速器であるハドロンコライダーの SSC（Superconducting Super Collider）が計画実施半ばでその規模の大きさと予算の増加に対する反省がエネルギー省によりなされ、建設中止となった。その結果アメリカ合衆国での高エネルギー加速器の研究開発は、衝突型線形加速器であるリニアコライダー及び SSC と比べて規模の小さい新たな円形のハドロンコライダーが主流になっており、続いて円形レプトン衝突型加速器であるミュオンコライダーが開発計画にある主要な加速器として挙げられてきた。

【0005】一方ヨーロッパでは、最後のハドロンコライダーと考えられる円形加速器 LHC（Large Hadron Collider）の建設が進められており、またレプトン衝突型加速器としてはアメリカと同様にミュオンコライダーの開発計画も検討されはじめている。

【0006】このように次世代における高エネルギーハドロンコライダーの研究開発の中心はアメリカからヨーロッパに移行しようとしており、アメリカの高エネルギー物理学界は危機感を持ちつつある。このような情勢からアメリカでは超大型加速器 VLHC（Very Large Hadron Collider）計画が提案されようとしている。

【0007】他方で、本発明者等は、円形加速器の小型化という観点から高磁場永久磁石を開発してきた（永久磁石を用いた高磁場円形荷電粒子加速器（熊田他、特願 2000-301078）、磁界発生装置（熊田他、特願 2001-086098））。しかし、これらの発明で得られる高磁場は直流磁場として利用されるため、粒子加速器としては小型サイクロトロン或いは FFA G

(Fixed Field Alternating Gradient) 加速器等に利用されるに限られていたことは否めない。

【0008】ところで、最近のマグネットテクノロジーの最先端としてVLHCの研究開発現場においては、主にFermilab (Fermi National Accelerator Laboratory) で使用されている磁石の構造を極端に単純化した超伝導伝送線路マグネット (Transmission Line Magnet/Pipetron) が研究開発されている。

【0009】この磁石の構造は、超伝導ケーブルをパイプ状にして通電し、このパイプの周りに上下2方向から鉄芯を被せ、それらの鉄芯間にお互いに逆方向であるダイポール磁場の空隙を2つ作るというものである。加速器としては、円周上にいくつも並んだこの磁石の空隙中に、陽子をお互いに逆方向に回して衝突させようというもので、その周長は240 kmに達する。この磁石は単純な構造のため低価格であることが最大の特長で、占積率を95%として超伝導電磁石だけで日本円に換算して2400億円強と言われている。

【0010】逆に最も不満な点は、かなり無理をしても磁場強度が2テスラを超えることができないと言う点である。これは鉄が飽和してしまうために磁場の励磁の増加とともに磁場分布が変化してしまい、特に貯蔵リングに必要とされる高精度な磁場の空間分布が維持できなくなってしまうためである。現在、この2テスラの壁を超えることはできていない。

【0011】そのためVLHC計画では計画を2期に分割せざるを得ず、2テスラ磁石の後、第2期計画として同じトンネルに9.8テスラの高磁場磁石を入れるという計画が出ている。しかし、2テスラでは以前に計画の最中で挫折してしまったSSC (Superconducting Super Collider) と変り映えがしないという批判もあり、2テスラを超える磁石を実現させたいという要望が高い。これが本発明が解決すべき第1の課題である。

【0012】更に上記のようなことが可能になれば、高エネルギー最先端加速器も医療用加速器のシンクロトロン的小型化への道も開ける可能性がある。偏向磁場強度が3テスラに及ぶ小型シンクロトロンは高磁場永久磁石FFAGとともに新たな利用価値が生まれ、医療用・治療用加速器の普及に大きなインパクトを与えることになる。これが本発明の解決すべき第2の課題である。

【0013】そこで、この出願の発明は、以上のとおり事情に鑑みてなされたものであり、従来技術の問題点を解消し、円形荷電粒子加速器において、荷電粒子を偏向及び収束・発散させるために必要な高強度の磁場を形成する、永久磁石組込型高磁場発生装置を提供することを課題としている。

【0014】

【課題を解決するための手段】この出願の発明は、上記の課題を解決するものとして、まず第1には、鉄芯及び鉄ヨークを用いず磁極間に空隙を有する永久磁石を、鉄

芯及び鉄ヨークの少なくとも一方を用いた超伝導電磁石による外部磁場中に置き、鉄芯及び鉄ヨークの少なくとも一方を飽和させることなく加速器の性能に必要な高い磁場の空間分布を維持しつつ、永久磁石に設けた空隙中の磁場強度が、永久磁石による磁場と超伝導電磁石による外部磁場の合成磁場の磁場強度となることを特徴とする高磁場発生装置を提供する。

【0015】第2には、第1の発明において、合成磁場の磁場強度が、2テスラ以上であることを特徴とする高磁場発生装置を提供する。さらに、第3には、鉄芯及び鉄ヨークを用いず磁極間に空隙を有する永久磁石を、超伝導材料以外の材料から成る通常のコイルと鉄芯及び鉄ヨークの少なくとも一方を用いて磁場を発生させる電磁石の空隙中に置き、鉄芯及び鉄ヨークの少なくとも一方を飽和させることなく加速器の性能に必要な高い磁場の空間分布を維持しつつ、永久磁石に設けた空隙中の磁場強度が、永久磁石による磁場と電磁石による磁場の合成磁場の磁場強度となることを特徴とする高磁場発生装置を提供する。

【0016】また、第4には、第3の発明において、合成磁場の磁場強度が2テスラ以上であることを特徴とする高磁場発生装置を提供する。また、第5には、第3の発明において、速い励磁の繰返しの運転を可能とするため、永久磁石の構成要素が絶縁された小さい単位磁石であることを特徴とする高磁場発生装置をも提供する。

【0017】また、第6には、第1又は第3のいずれかの発明において、永久磁石が希土類系の磁石材料から成ることを特徴とする高磁場発生装置をも提供する。また、第7には、第1又は第3のいずれかの発明において、永久磁石を液体窒素温度で冷却し、磁場の温度安定性を向上し残留磁束密度および保磁力をも併せて向上させることを特徴とする高磁場発生装置をも提供する。

【0018】また、第8には、第1～第7のいずれかの発明において、電磁石と永久磁石の組合せが、加速器のビーム方向に対して横方向の面内での組合せであることを特徴とする高磁場発生装置をも提供する。

【0019】また、第9には、第1～第8のいずれかの発明において、シンクロトロン加速器で荷電粒子を収束させる際に電磁石と永久磁石の磁場勾配の比が等しくなることを特徴とする高磁場発生装置をも提供する。

【0020】

【発明の実施の形態】この出願の発明の磁界発生装置は、まず第1の課題を解決するために、Fermilabのフォスター等の発明した (Fermilab report, "Design study for a staged VLHC") Fermilab TM-2149, 6/4/01) 超伝導伝送線路マグネットに希土類系磁石材料を用いた永久磁石を組み合わせることで、フォスター等の開発では不可能であった3テスラから4テスラの磁場強度を空隙 (ギャップ) 磁場で実現させようというものである。

【0021】3テスラ磁石の場合、1.5テスラを超伝

10

20

30

40

50

導電磁石で作り、残りの 1.5 テスラを永久磁石で作
り、永久磁石の磁極間に設けた空隙に、それぞれの磁石
による磁場を重畳させた合成磁場を得る。超伝導伝送線
路マグネット全体は 240 mm × 280 mm 程度であ
り、超伝導ケーブルで形成した超伝導パイプの直径が約
40 mm であるのに比べてかなり大きく、また、ビーム
パイプのサイズは、20 mm × 40 mm 程度であり、超
伝導伝送線路マグネット全体はビームパイプに比べても
かなり大きい、永久磁石を挿入するのに適当な大き
さといえる。

【0022】超伝導伝送線路マグネットにおける 2 つの
鉄芯間の空間であり、ビームパイプを挿入する空間に、
永久磁石が 1.5 テスラの磁場を生成させる。尚、永久
磁石は磁極間に空隙を有する U 字形や C 字形や O 字形等
をしており、その外径は 100 mm 程度で良く、超伝導
伝送線路マグネットの鉄芯の形状を変更させて、この 1
00 mm の空間を永久磁石の設置のために設ける。

【0023】超伝導伝送線路マグネットは永久磁石に対
しては 1.5 テスラの外部磁場を作ることになるが、そ
れ自身の鉄芯はこの外部磁場の外側にあるので単独で
1.5 テスラを生成するときと比べて超伝導伝送線路マ
グネットの鉄芯内部の磁場は強くなることはない。ま
た、永久磁石は 1.5 テスラという強い外部磁場に曝さ
れることになるが、希土類系の磁石材料では最大 3 テス
ラまでの外部磁場に耐えられる保磁力の高いものが入手
可能であるので問題は少ない。

【0024】よって、超伝導伝送線路マグネットに挿入
した永久磁石の磁極間の空隙中には、永久磁石による磁
場と超伝導伝送線路マグネットによる磁場の合成磁場が
得られる。

【0025】それぞれの磁石の磁場強度は、正確には永
久磁石の方を 0.1 テスラ程度高くしておき、超伝導伝
送線路マグネットをシンクロトンモードのため交流励
磁したときの最小磁場が、例えば入射磁場の 0.1 テス
ラ（最大磁場は 3.1 テスラ）になるようにして所定の
エネルギーの荷電粒子を入射可能とさせる。この永久磁
石は超伝導ケーブルから成る超伝導パイプの両側に左右
対称になるように設置され、超伝導パイプとの間の電磁
力も左右対称になるので、当初の超伝導伝送線路マグネ
ットに働く電磁力が小さいという利点は変わらない。ま
た永久磁石の大きさは超伝導伝送線路マグネットと比べ
てかなり小さいので、コストも大きくならず大幅にエネ
ルギーを増大させることができる。

【0026】第 2 の課題の解決においても、外径が 10
0 mm 程度の 1.5 テスラ永久磁石が有効である。従来
の H 型或いは C 型の電磁石において、< 100 mm + 磁
気回路的に必要な幅 > となる幅の空隙を設け、鉄芯及び
鉄ヨークを用いず磁極間に空隙を有する永久磁石を電磁
石の空隙の中心に設置することで永久磁石の空隙におけ
る磁場が電磁石による磁場と永久磁石による磁場の合成

磁場となる。第 1 の課題の場合と同様、外部磁場は 1 .
5 テスラ程度であるので保磁力の高い永久磁石材料を選
ぶことで減磁効果は避けることができる。

【0027】また、超伝導伝送線路マグネット又は通常
の電磁石の空隙に永久磁石を挿入した際、永久磁石を液
体窒素温度で冷却することで、磁場の温度安定性を向上
させ、残留磁束密度および保磁力をも併せて向上させる
ことが可能となる。

【0028】また超伝導電磁石の場合では磁石の励磁の
繰返しが遅いのと比べ、従来の電磁石では励磁の繰返し
を速くすることができる。この場合、第 2 の課題を解決
する際、励磁のスピードに応じて小さく絶縁された分割
された小磁石で永久磁石を構成する。

【0029】超伝導伝送線路マグネット / 通常電磁石の
いずれの場合においても特に注意すべき点は、この発明
での磁石はシンクロトン等の円形加速器への応用であ
るため、この発明での磁石を純粋な偏向磁石として用い
る場合は問題ないが、これに収束作用を持たせる場合に
は偏向磁場強度の変化に応じて収束力も一定に保持する
必要があるということである。そのためには永久磁石の
磁場勾配と超伝導伝送線路マグネット / 通常電磁石の磁
場勾配を等しくとる必要がある。

【0030】また、超伝導伝送線路マグネット / 通常電
磁石のいずれの場合においても、電磁石と小型永久磁石
を加速器のビームの進行方向に対して、横方向 (trans
versedirection) の面内で組み合わせを行っているのが
この発明の特徴である。

【0031】以下、添付した図面に沿って実施例を示
し、この発明の実施の形態についてさらに詳しく説明す
る。もちろん、この発明は以下の例に限定されるものでは
なく、細部については様々な態様が可能であることは
言うまでもない。

【0032】

【実施例】< 実施例 1 > 図 1 に Fermilab のフォスターが
VLHC 用に提案した超伝導伝送線路マグネット (6)
の断面図を示す。この超伝導伝送線路マグネット (6)
は従来の銅コイル電磁石の銅コイルの部分を超伝導コ
イルで置き換えたスーパーフェリック型超伝導マグネット
と言える。

【0033】この超伝導伝送線路マグネット (6) は、
超伝導ケーブルによって形成した超伝導パイプ (2) を
液体ヘリウム (1) で冷やし、超伝導パイプ (2) の外
側の真空絶縁ダクト (3) の周囲に鉄芯 (鉄ヨーク)
(5) を上下 2 方向から被せ、超伝導パイプ (2) の左
右両側にビームダクト (4) を 2 つ設けた構造となってい
る。尚、この図には示していないが、実際はこの断面
の下側にリターンの超伝導ケーブルがある。

【0034】この超伝導伝送線路マグネット (6) の最
大の特徴は、超伝導ケーブルによって形成された超伝導
パイプ (2) の左右が対称になっていて、電磁力が超伝

導パイプ(2)にはほとんどかからないことである。従って、超伝導パイプ(2)をなす超伝導ケーブルとして電磁力に対抗するための強固な構造材を必要としないため、コストが圧倒的に安価となる。フォスター等の主張では240kmの加速器の周長に超伝導伝送線路マグネット(6)をほぼいっぱい詰めても2億ドルしかからないということである。日本円に換算すると100万円/mであり常伝導磁石よりも桁違いに安価であると言える。

【0035】図2の破線は、元の鉄芯(5)の位置を示し、実線は小型永久磁石を挿入するために空隙を広げた状態に鉄芯(5)が位置しているときの超伝導伝送線路マグネット(6)の様子を示す。

【0036】図3は、ビームダクト(4)の周りに、磁極間に空隙を有するC字形の小型永久磁石(7)を設置し、小型永久磁石(7)によって形成されるビームダクト(4)中の磁場の向き(8)を示している。

【0037】図4では超伝導伝送線路マグネット(6)の空隙の中に小型永久磁石(7)を挿入した様子を示す。以上の図は寸法の縮尺比はおおよそ正しいが概略図である。概算では1.5テスラを出すのに小型の超伝導伝送線路マグネットだけで済んでいるので、この発明の磁石の追加コストも併せたコストは、フォスター等が開発した元の超伝導伝送線路マグネットとほぼ同額であると期待される。＜実施例2＞図5に従来の銅コイルを用いたH型電磁石(9)の断面図を示す。ここでは鉄芯(10)と鉄ヨーク(11)と銅コイル(12)とが電磁石を構成し、そこに形成される空隙中において、ビームダクト(13)を有する小型永久磁石(14)を、冷却ダクトとしての液体窒素槽(15)の中に設置し、液体窒素(16)を封入している。この例ではビームダクト(13)が永久磁石(14)の磁極間の空隙に当り、ビームダクト(13)中の磁場がH型電磁石(9)による磁場と永久磁石(14)による磁場の合成磁場となる。

【0038】H型電磁石(9)の空隙中の永久磁石(14)等を液体窒素(16)で冷やす目的は、加速器に使用するための磁場の温度安定性を高めるためと、低温での磁化特性の向上である。図には示していないが、実施例1の形態においても空隙中の永久磁石等を液体窒素で冷やすことも可能である。

【0039】超伝導電磁石では励磁の繰返しが遅いの 비해、従来の電磁石では励磁の繰返しを速くすることができる。実施例2の形態では励磁のスピードに応じて、小さく絶縁され且つ分割された小磁石で永久磁石を構成することも可能である。永久磁石は電磁石によって変化する外部磁場中に入れると、渦電流が流れ加熱されたり渦電流による磁場が発生するが、上記のように永久磁石を絶縁且つ分割された小磁石で構成することでこれらのことを回避することができる。

【0040】実施例1、実施例2のいずれの形態におい

ても電磁石と小型永久磁石を加速器のビームの進行方向に対して横方向の面内で組合せを行っている。

【0041】

【発明の効果】以上詳しく説明したとおり、この発明によって、超伝導電磁石と永久磁石を組み合わせることにより、高性能磁場分布を維持しつつ、2テスラを超えて4テスラ近くまでの遅い励磁の繰返しの運転を可能とする高磁場発生装置が提供される。同様に超伝導電磁石以外の電磁石と永久磁石の組合せにより速い励磁の繰返しの運転も可能となる高磁場発生装置が提供される。

【0042】上記のような超伝導電磁石と永久磁石を組み合わせた磁石は低価格中磁場(3~4テスラ)で、低磁場(2テスラ)では困難であった超伝導電磁石における鉄の飽和の問題を解決し、そして永久磁石でしばしば不便な直流磁場という問題をも解決でき、両者の欠点を取り除くことが可能となる。

【0043】また超伝導電磁石以外の電磁石においても同様に、小型の永久磁石との組み合わせることで従来不可能であった3テスラの交流磁場の領域まで可能にし、医療用等の低価格小型加速器への応用への道を開くことができる。

【図面の簡単な説明】

【図1】この発明の一実施例の高磁場発生装置に用いる超伝導伝送線路マグネットの断面図である。

【図2】同じ実施例の高磁場発生装置において、小型永久磁石を挿入するために超伝導伝送線路マグネットの磁極の間隔を広げたときの様子を示した図である。

【図3】同じ実施例の高磁場発生装置に用いる小型永久磁石の外観を示した図である。

【図4】同じ実施例の高磁場発生装置において、小型永久磁石を超伝導伝送線路マグネットに組み込んだときの様子を示した図である。

【図5】他の実施例の高磁場発生装置において、小型永久磁石を従来型電磁石の空隙に組み込んだときの様子を示した図である。

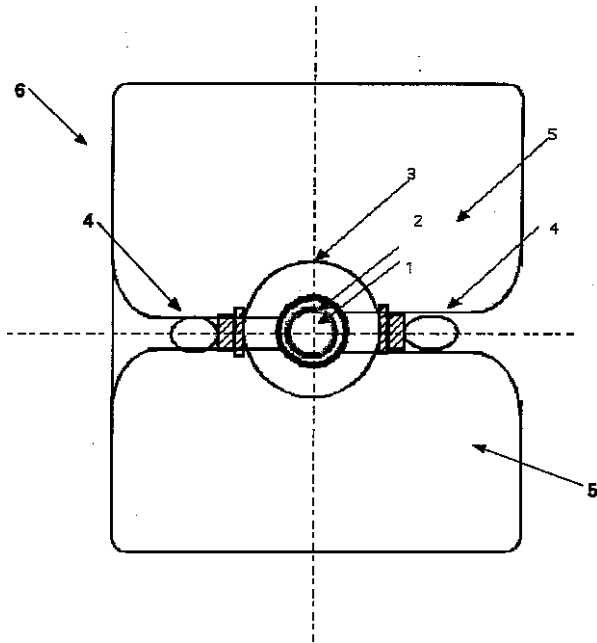
【符号の説明】

- 1 液体ヘリウム
- 2 超伝導パイプ
- 3 真空絶縁ダクト
- 4 ビームダクト
- 5 鉄芯(鉄ヨーク)
- 6 超伝導伝送線路マグネット
- 7 永久磁石
- 8 空隙の磁場の向き
- 9 H型電磁石
- 10 鉄芯
- 11 鉄ヨーク
- 12 銅コイル
- 13 ビームダクト
- 14 小型永久磁石

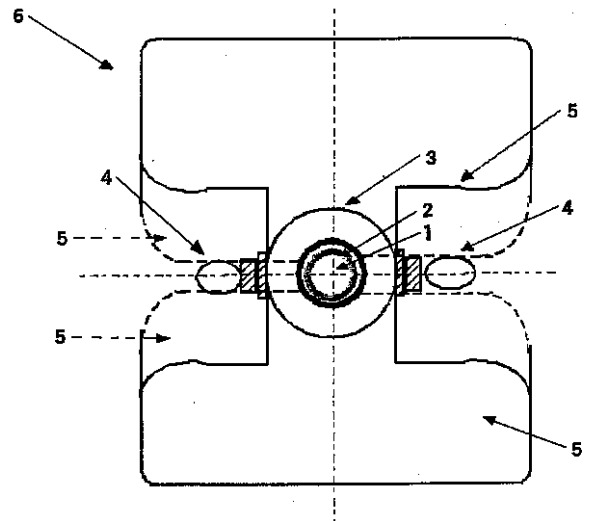
1 5 液体室素槽

* * 1 6 液体室素

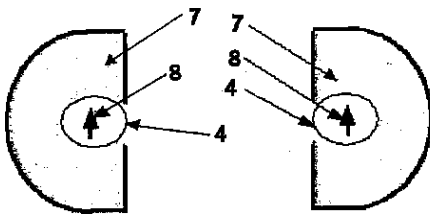
【図1】



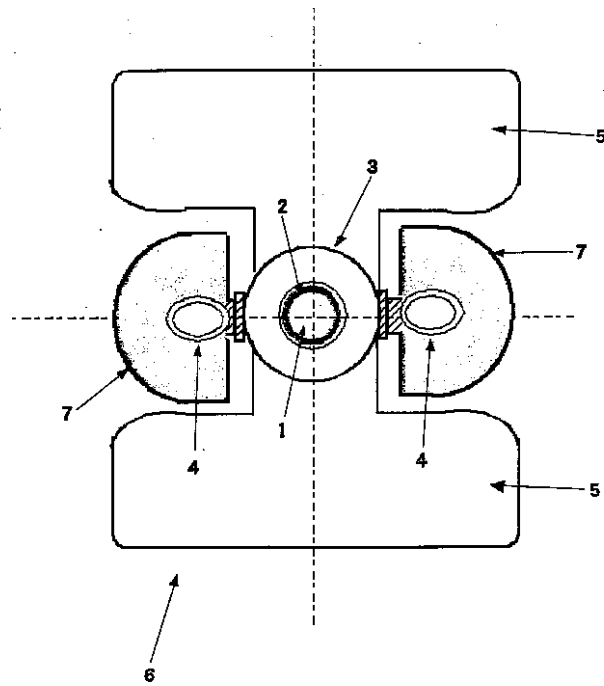
【図2】



【図3】



【図4】



F ターム(参考) 2G085 AA11 AA13 BA14 BC02 BC04
BC05 BC06 BC15 BC18 BC20
BE02 CA05 CA16 EA01 EA06
EA07